

## 肥効調節型肥料の溶出機構と野菜の施肥改善

著者	藤澤 英司
号	628
発行年	2000
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/16912">http://hdl.handle.net/10097/16912</a>

氏 名(本籍) 藤 澤 英 司

学 位 の 種 類 博 士 (農 学)

学 位 記 番 号 農 第 6 2 8 号

学位授与年月日 平 成 12 年 12 月 14 日

学位授与の要件 学位規則第 4 条第 2 項該当

学 位 論 文 題 目 肥効調節型肥料の溶出機構と野菜の施肥改善

論文審査委員 (主 査) 教 授 三 枝 正 彦  
教 授 菅 原 和 夫  
教 授 前 忠 彦

# 論文内容要旨

## 第1章 研究の背景および目的

農業現場における生産性の向上や労働力の問題から、できるだけ施肥作業を軽減することが必要である。環境への負荷を軽減する持続性のある生産方式の観点からは、作物の生育ステージに応じて必要量を過不足なく供給していく施肥法の確立が求められている。

緩効性肥料の一種である被覆肥料は、追肥を省略する省力施肥法に用いられているが、最大の特長は溶出期間が細かく設定されその再現精度が高いこととリニア型やシグモイド型などの多様な溶出タイプがあることである。このような溶出コントロール特性（肥効調節機能）から、従来の化学合成緩効性肥料とは異なり、被覆肥料を用いることによって新しい施肥法の開発が可能となる。

本研究では、1) 様々な施用条件下において被覆肥料の溶出を正確に推定する手法を確立するために、溶出機構を詳細に検討した。2) 溶出機構にもとづいた溶出率の推移を精度良く推定するモデルを確立した。3) 溶出推定の手法を用いて、野菜の施肥改善のための栽培試験を実施した。

## 第2章 被覆肥料の溶出機構の解明

### 第1節 溶出に影響を与える要因

被覆肥料の溶出に関わる要因について、その影響度、作用機作について明らかにした。樹脂系被覆肥料の溶出に大きく影響する要因は温度であり、土壤水分は水田および通常の畑条件では影響はほとんどないことを明らかにした。また、土壤 pH、土壤の種類も影響がないことを明らかにした（第1, 2図）。しかし、無機系被覆肥料の溶出には、微生物活性が影響することが推察された。

### 第2節 溶出と水蒸気圧の関係

溶出の過程は水蒸気の浸入から始まり、溶解した肥料溶液が溶出する一連の流れである。したがって、肥料成分の溶出速度は水（水蒸気）の浸入速度に影響される。水蒸気圧と溶出率の関係は、同一温度における塩類飽和溶液雰囲気中での溶出においても成り立つことが確認された（第3図）。このことから、被覆肥料の溶出制御の主体は水蒸気圧であり、溶出速度の温度依存性は水蒸気圧の熱力学的特性によることを明らかにした。

### 第3節 成分ごとの溶出特性と原料肥料の化学性の関係

被覆複合肥料のリン酸およびカリウム成分の溶出速度は、窒素と異なる場合がある。その理由は、原料肥料を構成する多数の化合物を同定し、それぞれの溶解度を明らかにすることにより説明された。すなわち、溶解度が大きい化合物ほどそれに含まれる成分の溶出速度が速く、溶解度と熱力学的に同義の溶液の水蒸気圧が溶出に関係していることを明らかにした（第4図）。

## 第3章 被覆肥料の溶出予測法の確立

## 第 1 節 既往の溶出予測法の問題点

これまでに提案された被覆肥料の溶出推定モデルは、例えば積算温度法などのように限られた条件の範囲内でのみ適用できる溶出機構とは直接の連動がない当てはめ法であった。これに対し、溶出速度の温度依存性を反応速度論的手法で解析し、1 次反応速度式で表した石橋ら（1992）のモデルは被覆肥料の温度特性に良く適合し、溶出率を解析するのに適していることを明らかにした。しかし、この方法はシグモイド型溶出タイプの適合性が悪く、パラメータと被覆肥料の溶出機構との関係が明確でないため改良する必要がある。

## 第 2 節 肥料粒子内への水の浸入と溶出の関係

被覆肥料の溶出プロセスは、水が水蒸気の形態で被膜を通して肥料粒子内部へ浸入することから始まり、溶出開始までに一定量の水の浸入が必要である。熱可塑性樹脂被覆肥料では水の浸入に伴う肥料粒子の体積の増加は小さいが、熱硬化性樹脂被覆肥料は溶出開始までに体積が大きく増加する。また、体積の増加率に温度との関係がみられ、その関係には熱硬化性樹脂被覆肥料の中でも違いがあった（第 5 図）。体積増加率の大小やその温度依存性もまた、溶出速度の温度依存性と関係していると考えられた。熱可塑性樹脂のシグモイドタイプの場合は、溶出誘導期間に相当する間は、水の浸入がほとんどなく、水の浸入が開始すると同時に溶出が始まる。また、見かけ上溶出誘導期間が無いリニアタイプの場合も、水が浸入を開始するまでに少しの時間を要した（第 6 図）。したがって、シグモイドタイプは水が浸入し、被膜を膨張させるまでの時間が長い肥料といえる。被覆肥料の溶出機構について、樹脂の種類および溶出タイプの違いに関わらず、水（水蒸気）の浸入によって被膜が膨張することから溶出が開始し、温度が水の浸入速度および溶出速度を規定しており、溶出の全過程に水蒸気の熱力学的特性すなわち温度特性が関わっていることを明らかにした。溶出機構の観点から、石橋らの溶出モデルの改善点を明らかにした。

## 第 3 節 単粒子ごとの溶出の変動と溶出特性の関係

被覆肥料の溶出カーブを個々の粒子ごとに測定し、溶出速度は変動が大きく、通常観察している溶出カーブが個々の溶出曲線の平均であることを明らかにした。特に、シグモイドタイプの溶出は溶出誘導期間の長さに大きな変動がみられた（第 7 図）。その日数の分布を正規分布とみなすことにより、溶出カーブの立ち上がり部分の形状を再現することを可能にした。この溶出誘導期間の変動を溶出モデル式に組み込むことにより、溶出カーブの再現性を向上させることが可能となった（第 8 図）。溶出機構にもとづく溶出モデル式を下記のとおり確立した。

$$N = A(1 - \exp(-k t_k))$$

$$t_k = \sum D \exp(E_{a1}(T - T_s) / R T T_s)$$

$$D = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{t_{\text{tau}}} \exp\left\{-\frac{u^2}{2}\right\} du$$

$$u = \frac{t_{\text{tau}} - \tau}{\sigma}$$

$$t_{\text{tau}} = \sum \exp \{ E_{a2} (T - T_s) / R T T_s \} \quad (7)$$

ただし、 $N$  = 溶出率 (%),  $E_{a1}$ ,  $E_{a2}$  = 見かけの活性化エネルギー ( $\text{J mol}^{-1}$ ),  $t$  = 基準温度変換日数 (d),  $A$  = 最大溶出率 (%),  $k$  = 溶出速度定数 ( $\text{d}^{-1}$ ),  $T$  = 任意温度 (K),  $T_s$  = 基準温度 (298K),  $R$  = 気体定数 ( $8.314 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$ ),  $\tau$  = 溶出誘導期間 (d),  $\sigma$  =  $\tau$  の標準偏差 (d)

#### 第4節 高濃度溶液中での溶出と水蒸気圧の関係

被覆肥料の溶出速度が被膜内外の水蒸気圧差によって規定されていることを証明するため、リン酸二水素カリウムおよび塩化カリウムの飽和溶液中で溶出を検討した。被膜内（尿素）と被膜外（溶液）の水蒸気圧差を水中の温度に換算し、さらに溶液の浸透圧から最大溶出率を補正することによって、溶出モデルの推定値と実測値が一致することを明らかにした（第9図）。したがって、溶出速度が水蒸気圧によって直接規定されていることが証明され、さらに高濃度溶液中における溶出の状態を明らかにした。

#### 第5節 低水分土壤中での溶出

土壤の水分が極端に低い条件では、被覆肥料の溶出は通常条件下に比べて遅くなった。土壤の水分条件を水蒸気圧に換算し、さらにそれを水中における温度条件に変換して溶出をシミュレーションし、実測値との適合をみた。その結果、推定値に比べて実測値の方が溶出速度が遅いことを明らかにした（第10図）。したがって、非常に水分が低い条件における溶出の遅延には、水蒸気圧の低下以外の要因が関係していることが示唆された。この原因は、溶出した肥料溶液の拡散速度が低下することによって、高濃度溶液が肥料粒子の周りに停滞するため、被膜内外の水蒸気圧差を低下させたと推測した。

#### 第6節 低水分土壤中での溶出推定手法の確立

低水分土壤条件下での溶出速度の低下の現象を他の被覆肥料を含めて改めて検討した。性質の異なる4種類の被覆肥料すべてで、同様の現象が認められたので、溶出速度の低下程度と土壤水分ポテンシャルの関係を近似的に数式化した（第11図）。これを溶出モデル式に導入することにより、非常に乾燥した土壤条件下における溶出を推定することが可能となった。土壤水分条件を導入した溶出モデル式は下記のとおりである。

$$N = A \{ 1 - \exp(-k t_k) \} + B$$

$$t_k = \sum D \alpha \exp \{ E_{a1} (T - T_s) / R T T_s \}$$

$$D = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\tau} \exp \left\{ \frac{-u^2}{2} \right\} du$$

$$u = \frac{t_{\tau} - \tau}{\sigma}$$

$$t_{\tau} = \Sigma \exp \{ E_{a2} (T - T_s) / R T T_s \}$$

$$\alpha = \exp (0.10 \psi)$$

ただし  $t_{\tau} \leq \tau$  のとき  $\alpha = 1$

ここで、 $\psi$  = 土壌水分ポテンシャル (MPa)

## 第4章 被覆肥料の溶出予測値の適合性

### 第1節 水田ほ場に埋設した各種被覆肥料の溶出と推定値の適合性

溶出モデル式を用いて、実際の水田ほ場での溶出率の実測値と温度から計算した推定値との適合性を検討したところ、両者はよく一致し、溶出モデル式の有効性を明らかにした(第12図)。

### 第2節 畑での施肥位置、土壌水分条件における被覆肥料の溶出

露地畑の表層および作土層に埋め込んだ被覆肥料の溶出を測定し、地温および土壌水分ポテンシャルから推定した値との適合性を明らかにした。作土層に埋め込んだ肥料の推定溶出率は、土壌水分が比較的安定していたために、水分ポテンシャルの補正をする前の推定値とほとんど差がなく、実測値とも一致した。表層に埋設した肥料の溶出率は、土壌が一時的に非常に乾燥したため、作土層に埋設した肥料の溶出率に比べて低く推移した。土壌水分ポテンシャルを加えた溶出モデルで推定した溶出率は、この実測値とよく一致し、乾燥した土壌中においても被覆肥料の溶出が正確に推定できることを明らかにした(第13, 14図)。

### 第3節 露地畑での被覆肥料の溶出に与えるマルチ被覆の影響

露地畑でポリエチレンマルチをした土壌の地温と土壌水分を深さごとに測定し、埋設した被覆肥料の溶出率との関係を検討した。被覆肥料の溶出はマルチ被覆下が裸地に比べて速かったが、表層と作土層の比較では裸地およびマルチ被覆下とも、被覆肥料の溶出率に差は認められなかった。土壌水分はマルチ被覆下ではほぼ一定に保たれたが、裸地の表層では低く推移した(第1表)。水分ポテンシャルを考慮した溶出の推定結果と実測値の傾向は一致することを明らかにした。

### 第4節 露地畑での被覆肥料の溶出に与える植被の影響

キャベツを植え付けた畑と裸地に埋設した被覆肥料の溶出を、地温と土壌水分の関係から調べた。作物体が小さい栽培前半は植被と裸地の差は小さいが、後半は植被下に埋設した被覆肥料の方が裸地より溶出率が低いことを明らかにした(第2表)。植被下の被覆肥料の溶出が低下した時期は、作物が地表面を覆う割合である植被率がほぼ最大値となった

時期と一致することから、作物体が陰となり地温が低下するためであることを明らかにした。

## 第5章 被覆肥料の溶出特性を利用した野菜の施肥法の検討

### 第1節 施設栽培トマトにおける被覆肥料を利用した全量基肥施肥法の効果

栽培期間が長く、栄養生長と生殖生長が同時に進行するタイプの作物であるトマトに対して、考えられる肥効パターンを被覆肥料を利用していくつか作り、全量基肥施用によって栽培した。被覆肥料の全量基肥施肥法は対照の速効性肥料追肥体系区に比べて、収量が優り、尻腐れ果などの不良果の発生が少ないことを明らかにした。また、その原因は被覆肥料の緩やかな溶出のために、土壤中のアンモニウム態窒素濃度が急激に高まることがないためと推察した（第15図）。

### 第2節 温室栽培メロンにおける被覆肥料を利用した全量基肥施肥法の効果

栽培期間が比較的短く、果実の熟成期には肥料要求量が著しく減少するアールスメロンにおいて、被覆肥料を利用したいくつかの肥効パターンを設定して肥料窒素の利用を調べた。メロン果実の品質などから判断して、速効性肥料と溶出が速いタイプの被覆肥料を組み合わせることが重要であることを明らかにした。基肥の速効性肥料は施用後8週間まで吸収され、被覆肥料から溶出された窒素は定植直後から収穫期まで継続的に吸収された（第16図）。施肥窒素利用率は基肥硝安が45%、追肥硝安が49%であるのに対して、被覆尿素LP40タイプが51%、同LP70タイプは43%であったが、栽培終了時の溶出率を勘案した実質の利用率はどちらも56%であり、速効性肥料よりも高かった。

### 第3節 キャベツに対するセル育苗時被覆肥料施用と局所施肥法の効果

キャベツの省力および肥効率向上のための施肥技術として、セル育苗時の培地内にシグモイドタイプの被覆肥料を施用し、定植時に速効性肥料を局所施用する方法を確立した。被覆肥料を施用したセル苗はやや徒長したが、その後の生育と最終的な収量は良好であった。畑での施肥位置としては株元の条施または10cm×10cmの範囲に混和する方法が、20%の施肥量減でも収量は対照より優ることより、省力で機械化に対応する施肥法としての可能性を明らかにした（第3表）。

## 第6章 被覆肥料を利用した合理的な施肥設計作成のための被覆肥料の溶出シミュレーションソフトの開発

被覆肥料の溶出モデル式を組み込み、パソコン上で起動する被覆肥料の溶出を推定するソフト「JA-COAT」を開発した（第17図）。これによって各種の被覆肥料を任意の割合で配合し、実際のほ場の温度で溶出をシミュレートすることが可能になった。

このソフトは作物の種類などに応じた目標とする肥効パターンの肥料の組み合わせを予め検討し選択することが可能であり、最適な施肥設計を合理的に組み立てるために有効で

あることを明らかにした。

## 第7章 結論

### 第1節 被覆肥料の溶出特性とパラメータの意義

多数の銘柄の被覆肥料が市販されており、その溶出特性も多様である。被覆肥料の溶出コントロール特性を利用して、合理的な施肥改善に活用するためには、個々の被覆肥料の溶出特性を表現する指標が必要である。

溶出モデル式は被覆肥料の溶出機構を反映しており、個々の溶出パラメータはそれぞれ溶出特性を表したものである。溶出パラメータを比較することによって、溶出カーブがイメージでき、温度が変動したときの影響度合いも推定できる。このパラメータを被覆肥料の特性値として活用することは、利用者が肥料の特徴を理解するのを助けるとともに、製造メーカーにとっては製造ロット間の変動を数値で把握することができるため、品質管理に役立つ。

### 第2節 溶出推定を活用した施肥設計の考え方

第5章の結果から、作物の養分吸収特性に合わせた肥効パターンを適用することの有効性は明らかである。被覆肥料の溶出特性と溶出予測の手法を用いれば、様々な肥効パターンを策定することが可能である。最適な肥効パターンは養分吸収パターンと完全に一致するものではないが、局所施肥などの施肥位置や、作物の生育ステージに対応した養分濃度などを組み合わせることが有効と考えられる。肥効パターンを設定することは、精度の高い溶出再現性と様々な環境条件下においても正確に溶出を予測できる被覆肥料によって実現可能な施肥法であり、施肥改善において有効な手段である。

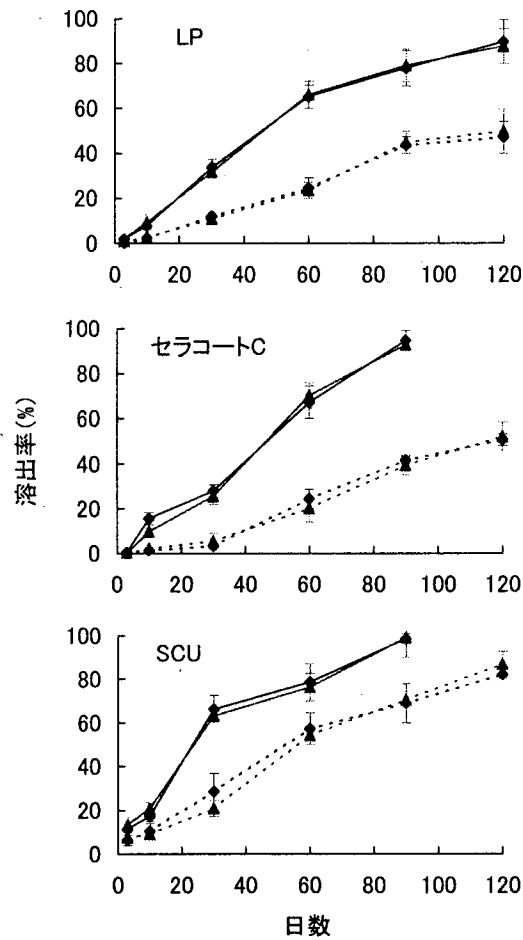
### 第3節 被覆肥料の溶出予測モデルと有機質肥料など他の肥料および土壌、堆肥由来の窒素無機化予測モデルとの組み合わせによる総合的な施肥改善

「JA-COAT」を使うことにより、被覆肥料の溶出予測が可能になったが、さらに肥料全体の肥効発現や土壌から無機化する窒素の発現量を予測し、施肥設計を総合的に改善するためのプログラムの開発も可能である。有機質肥料や土壌窒素の無機化モデルも反応速度論にもとづく推定式であり、被覆肥料の溶出モデル式と同様の手法が適用できる。

現在、各種の有機質肥料や堆肥類の無機化特性に関するデータを蓄積し、土壌の無機化においてはパラメータの簡易な設定手法の検討などを行っており、総合的な施肥改善を支援するためのプログラムを開発中である。

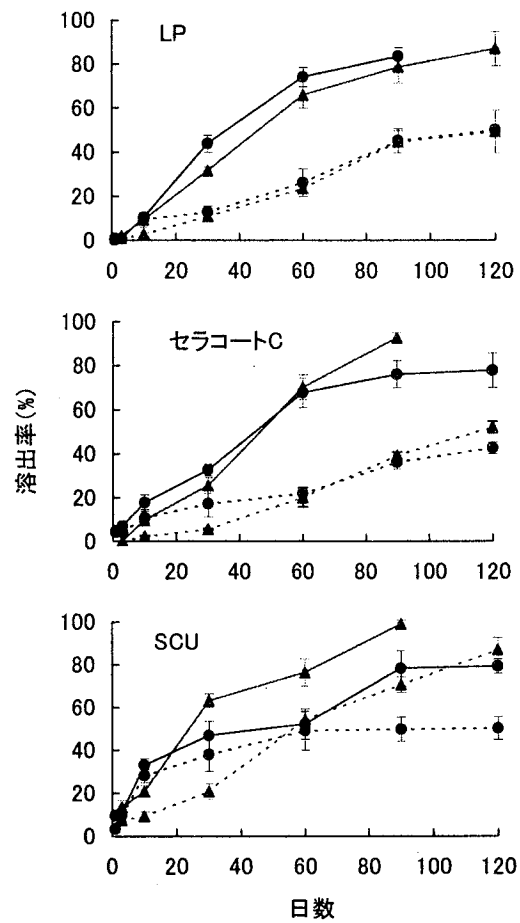
高い精度で肥効を予測できる被覆肥料に加えて、その他の肥料、堆肥類、土壌までを網羅した肥効を予測すれば、作物への養分供給を自在に組み立て、目的に応じた施肥の組み立てを設計することが可能となる。





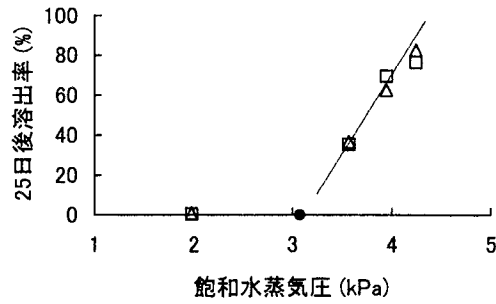
第1図 被覆肥料の土中溶出における土壌の種類の影響

—◆—: 黒ボク土 25°C, ...◆...: 黒ボク土 15°C, —▲—: 褐色低地土 25°C, ...▲...: 褐色低地土 15°C  
 土壌水分はいずれも最大容水量比55%. 図中の縦棒は測定値の範囲.



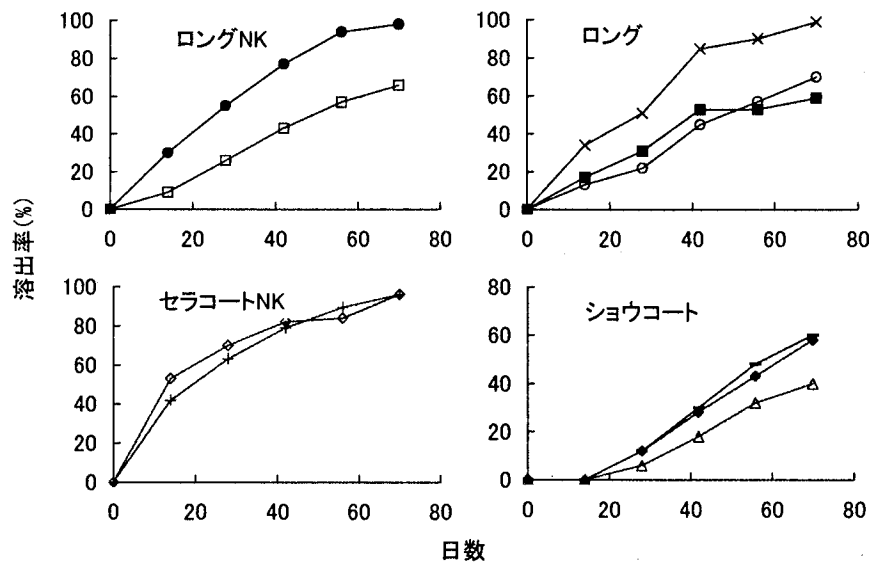
第2図 被覆肥料の土中溶出における畑および水田条件の影響

—▲—: 畑 25°C, ...▲...: 畑 15°C, —●—: 水田 25°C, ...●...: 水田 15°C  
 土壌は褐色低地土. 畑条件の土壌水分は最大容水量比55%. 水田条件は120%. 図中の縦棒は測定値の範囲.



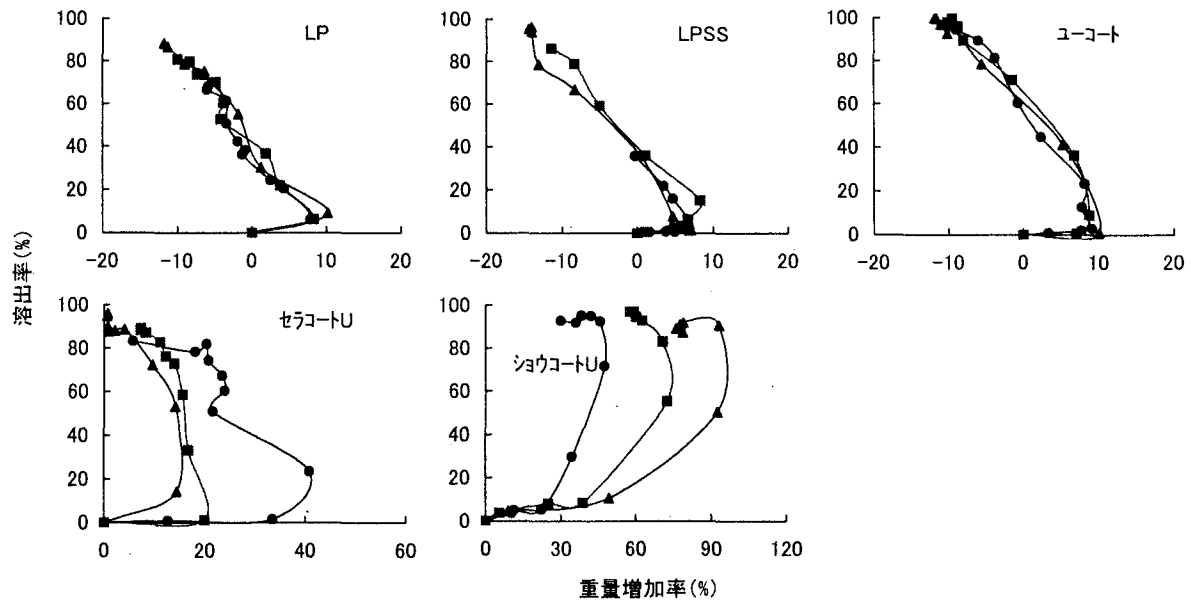
第3図 各種塩類飽和溶液雰囲気中の水蒸気圧 (30℃)と25日後の溶出率の関係

□:LP △:セラコートU ●:尿素  
尿素は飽和水蒸気圧の値を参考値としてプロットした。



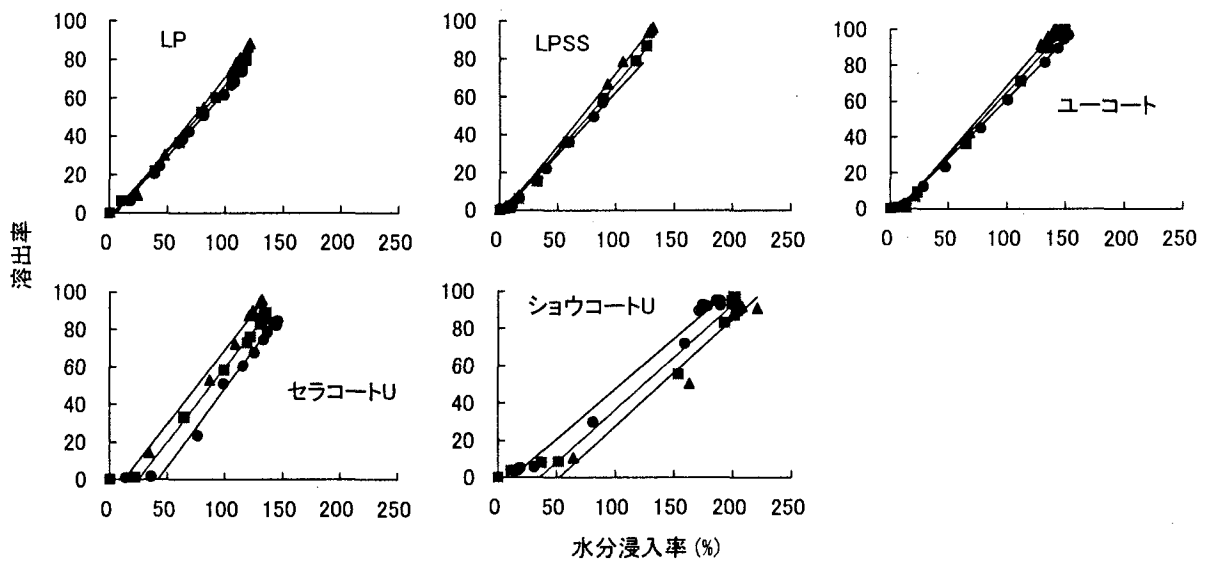
第4図 イオンの溶出率から推定した被覆複合肥料の構成塩類の溶出率

●:  $(\text{NH}_4, \text{K})\text{NO}_3(70:30)$  □:  $2(\text{NH}_4, \text{K})\text{NO}_3 \cdot (\text{NH}_4, \text{K})_2\text{SO}_4(55:45)$   
 ×:  $(\text{NH}_4, \text{K})\text{H}_2\text{PO}_4(95:5)$  ○:  $(\text{NH}_4, \text{K})\text{NO}_3(70:30), 2(\text{KNO}_3) \cdot \text{NH}_4\text{NO}_3$   
 ■:  $2(\text{NH}_4, \text{K})\text{NO}_3 \cdot (\text{NH}_4, \text{K})_2\text{SO}_4(60:40)$  ◇:  $(\text{NH}_4, \text{K})\text{Cl}(25:75)$   
 +:  $\text{NH}_4\text{Cl}$  ◆:  $\text{NH}_4\text{Cl}, (\text{NH}_4, \text{K})\text{Cl}(25:75)$  △:  $(\text{NH}_4, \text{K})_2\text{SO}_4(20:80)$   
 —:  $(\text{NH}_4, \text{K})\text{H}_2\text{PO}_4(90:10), (\text{NH}_4, \text{K})_2\text{HPO}_4$



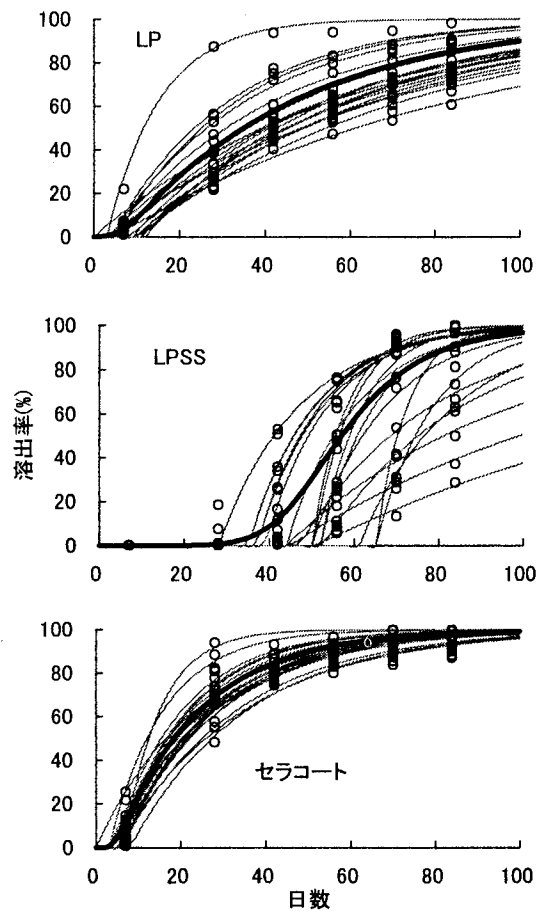
第5図 被覆肥料の溶出率と重量増加率の関係

●:20℃ ■:25℃ ▲:30℃



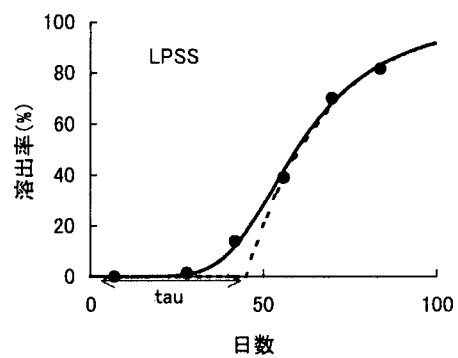
第6図 被覆尿素の溶出率と肥料粒子内部への水分浸入率の関係

●:20℃ ■:25℃ ▲:30℃



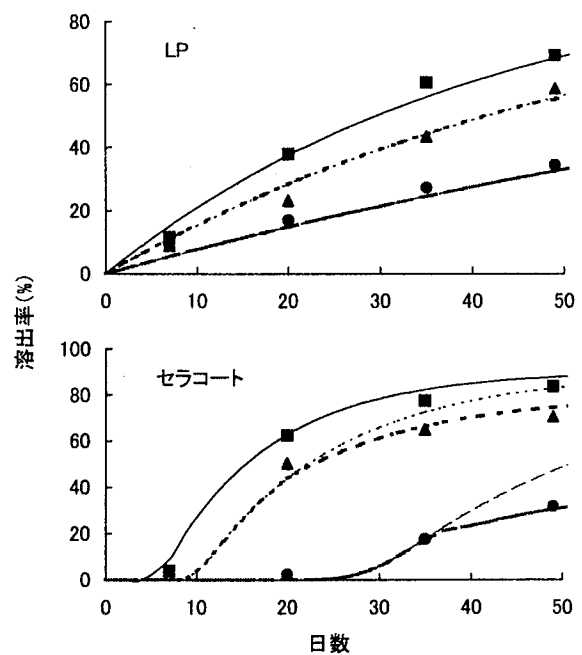
第7図 被覆尿素の単粒子ごとの溶出とその平均の溶出カーブ

○: 単粒子, —: 平均



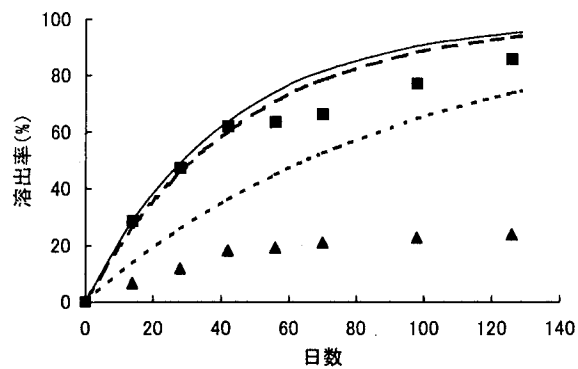
第8図 溶出誘導期間  $\tau$  の標準偏差  $\sigma$  の大きさによる溶出推定カーブの違い

●: 実測値 (平均), ...: 従来法の推定曲線, —: ガウス補正法 ( $\sigma = 10$ ) の推定曲線



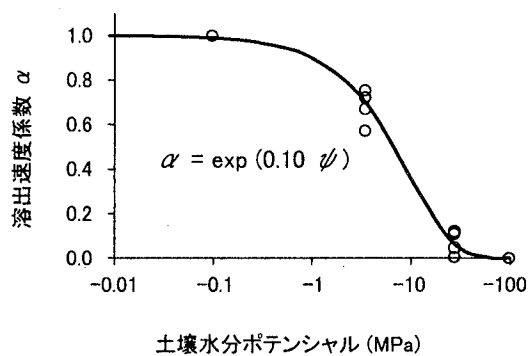
第9図 塩類飽和溶液中での溶出実測値と水蒸気圧差から換算した温度での溶出シミュレーション曲線

■: 水・実測, ▲: リン酸二水素カリウム・実測, ●: 塩化カリウム・実測  
—: 30°C sim, ...: 26.6°C sim, --: 19.5°C sim, ...: リン酸二水素カリウム sim, --: 塩化カリウム sim



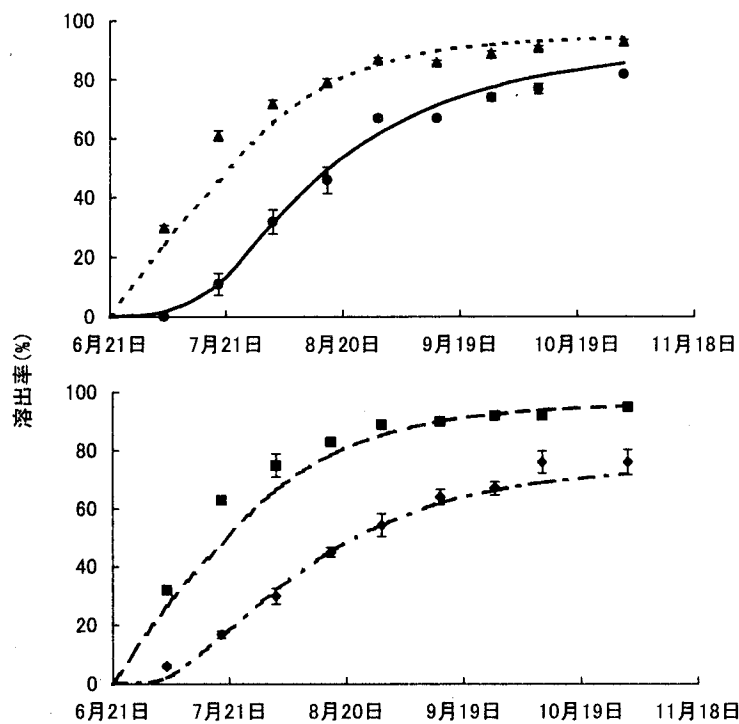
第10図 土壌水分条件を温度条件に換算した溶出シミュレーションカーブと実測値の適合性

■: 土壌水分ポテンシャル -0.1 MPa, ▲: 同 -3 MPa, —: 25°C sim, - - -: 23.6°C sim, ...: 13.2°C sim  
23.6°Cは-3MPa、13.2°Cは-40MPaに相当する。



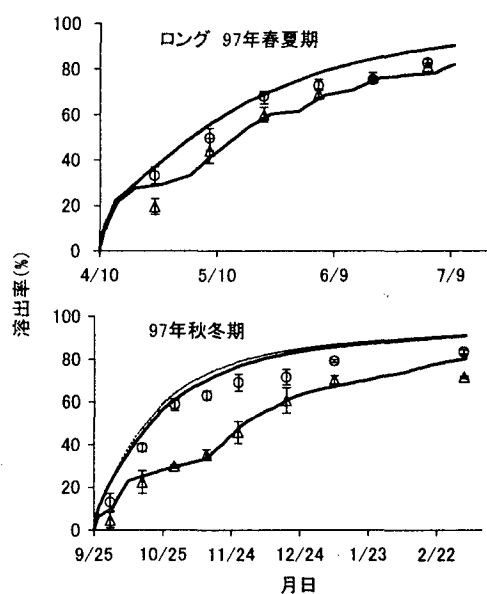
第11図 土壌水分ポテンシャルと溶出速度係数の関係

○: 測定値 —: 近似式  
 $\alpha$  = 溶出速度係数、 $\psi$  = マトリックポテンシャル (MPa)



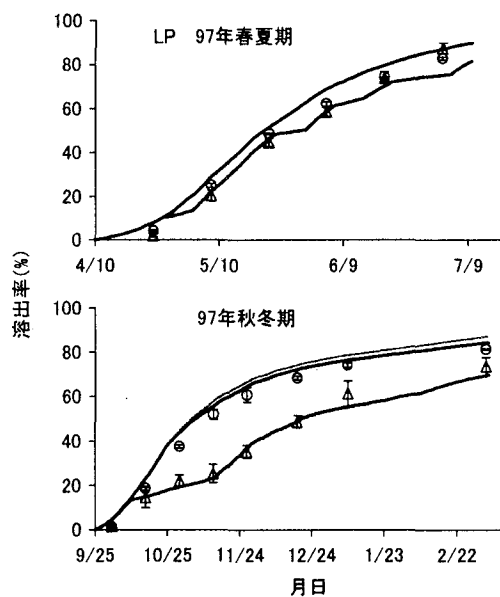
第12図 水田ほ場中での被覆肥料の溶出実測値と地温から推定した溶出シミュレーション曲線(1996年 平塚)

●: スーパーSRコート, —: スーパーSRコート sim, ▲: Duration, ...: Duration sim, ◆: Polyon, - - -: Polyon sim, ■: Multicote, - - -: Multicote sim  
図中の点は実測値. 縦線は標準偏差. 線は温度から推定した溶出シミュレーション.



第13図 作土層および表層に埋設したロングの溶出率

○:作土層 △:表層  
作土層は深さ10cm、表層は深さ1cm。図中の点が実測値、線が推定値。点線は土壌水分を考慮しない推定値。縦棒は標準偏差。



第14図 作土層および表層に埋設したLPの溶出率

○:作土層 △:表層  
作土層は深さ10cm、表層は深さ1cm。図中の点が実測値、線が推定値。点線は土壌水分を考慮しない推定値。縦棒は標準偏差。

第1表 露地畑のポリエチレンマルチ被覆の有無および埋設深さが被覆肥料の溶出に及ぼす影響

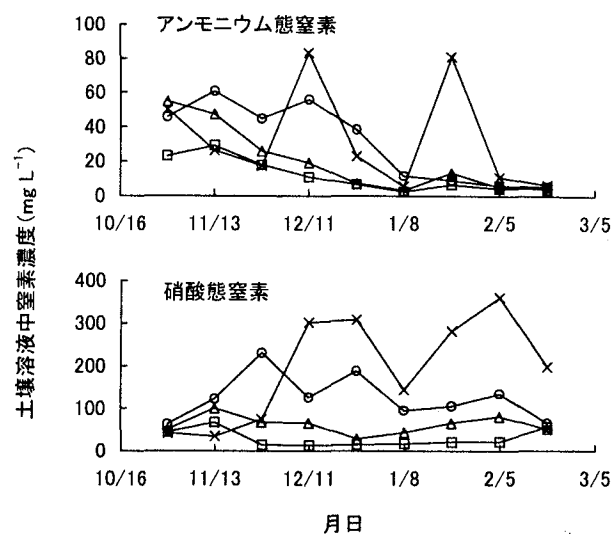
肥料	被覆	埋設位置	溶出率 (%)					
			1998/10/12 (14)	1998/10/26 (28)	1998/11/9 (42)	1998/11/24 (57)	1998/12/9 (72)	1999/1/18 (112)
ロング	裸地	深さ10cm	47.0 ± 0.8	62.6 ± 5.6	73.1 ± 1.8	75.7 ± 3.0	78.5 ± 0.4	83.8 ± 0.8
		深さ1cm	47.4 ± 2.3	61.4 ± 1.2	72.4 ± 3.4	75.6 ± 2.0	77.5 ± 4.0	84.2 ± 2.1
	マルチ	深さ10cm	53.3 ± 2.6	71.7 ± 4.9	73.6 ± 0.7	77.3 ± 1.5	84.4 ± 0.9	86.4 ± 0.8
		深さ1cm	54.0 ± 4.6	66.7 ± 3.8	74.2 ± 3.7	82.2 ± 1.5	83.9 ± 2.4	85.8 ± 2.9
LP	裸地	深さ10cm	9.3 ± 2.0	27.3 ± 0.7	46.1 ± 3.0	48.3 ± 2.2	56.7 ± 0.3	64.3 ± 4.9
		深さ1cm	11.1 ± 1.1	27.7 ± 0.7	49.6 ± 6.7	46.8 ± 4.2	56.2 ± 4.2	63.9 ± 8.8
	マルチ	深さ10cm	16.0 ± 2.4	35.4 ± 0.8	55.8 ± 0.9	59.4 ± 2.0	67.1 ± 2.6	75.9 ± 0.5
		深さ1cm	17.7 ± 0.7	37.7 ± 2.8	55.9 ± 0.3	64.2 ± 1.3	68.8 ± 0.5	79.4 ± 1.5

被覆肥料埋設 98/9/28. 値は平均±標準偏差。日付は調査日。( )内は埋設後日数。ロングは窒素の溶出率。

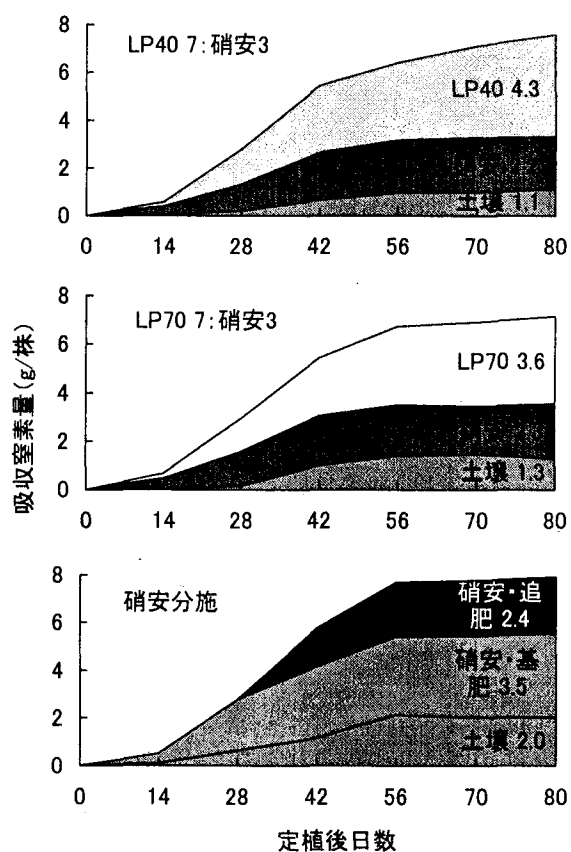
第2表 露地畑の植被の有無および埋設深さが被覆肥料の溶出に及ぼす影響

肥料	被覆	埋設位置	溶出率 (%)					
			1998/5/7 (14)	1998/5/21 (28)	1998/6/4 (42)	1998/6/18 (56)	1998/7/2 (70)	1998/7/16 (84)
ロング	裸地	深さ10cm	42.9 ± 0.8	64.2 ± 1.0	75.6 ± 3.9	78.4 ± 0.5	83.9 ± 2.6	88.9 ± 0.8
		深さ1cm	49.3 ± 2.9	64.4 ± 1.7	77.7 ± 0.8	78.6 ± 2.2	86.8 ± 2.4	89.3 ± 1.6
	植被	深さ10cm	45.2 ± 5.6	63.2 ± 2.9	70.8 ± 0.4	78.6 ± 1.9	85.7 ± 1.7	87.7 ± 1.6
		深さ1cm	40.7 ± 2.2	65.9 ± 2.0	72.4 ± 2.7	77.8 ± 1.3	84.8 ± 1.1	87.2 ± 1.0
LP	裸地	深さ10cm	10.2 ± 5.7	31.4 ± 4.2	50.0 ± 3.9	62.5 ± 1.3	75.9 ± 0.2	86.2 ± 0.9
		深さ1cm	24.4 ± 5.0	40.8 ± 2.9	55.8 ± 1.5	67.3 ± 1.2	78.9 ± 0.8	86.7 ± 0.9
	植被	深さ10cm	15.1 ± 6.2	32.2 ± 3.2	50.2 ± 1.4	59.5 ± 2.4	71.9 ± 0.9	81.8 ± 1.0
		深さ1cm	23.0 ± 3.6	39.0 ± 5.6	46.4 ± 2.0	59.7 ± 2.2	73.9 ± 0.9	82.8 ± 0.6

被覆肥料埋設 98/4/23. 値は平均±標準偏差。日付は調査日。( )内は埋設後日数。ロングは窒素の溶出率。



第15図 トマト栽培中の土壌溶液の窒素濃度の推移  
 ×: 尿素追肥区, ○: LP区, △: LPS区, □: LPSS区

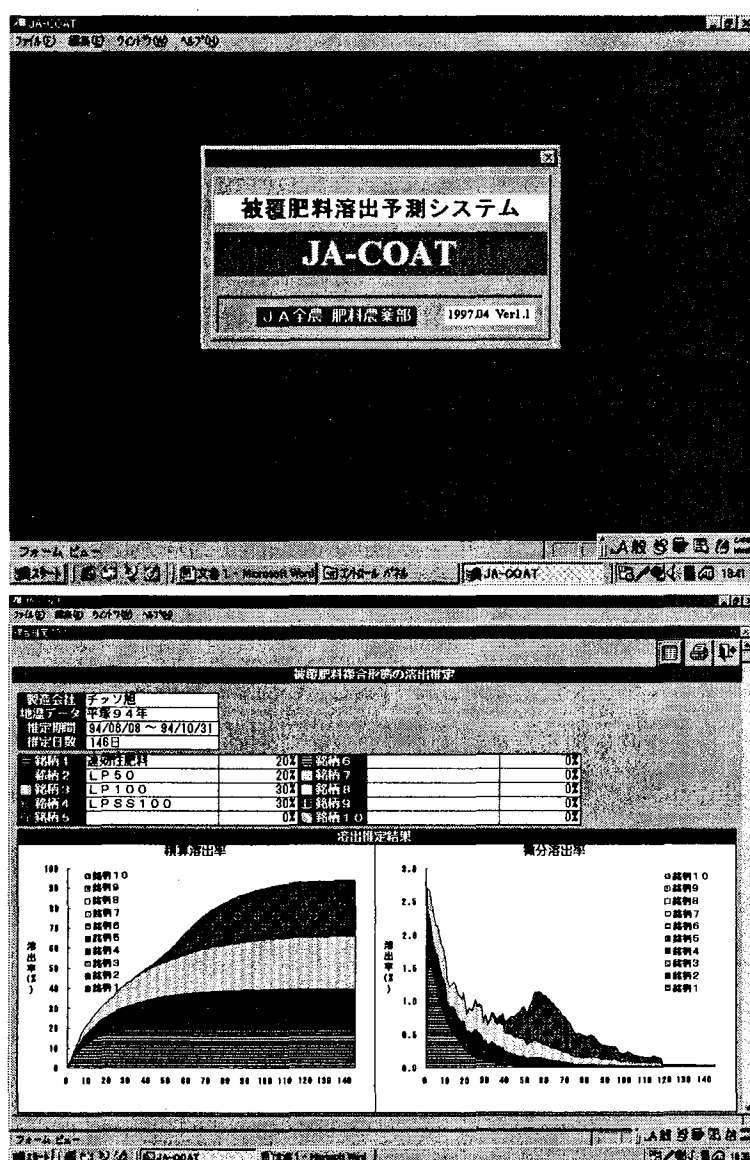


第16図 メロンの由来別吸収窒素量の推移  
 図中の数値は収穫時の由来別窒素吸収量を表す。

第3表 セル施肥キャベツの窒素吸収量と由来別利用率(秋冬作)

第5表 セル施肥による窒素吸収量と由来が利用効率(秋・冬)										
肥料名	施肥位置		施肥量		窒素吸収量		被覆肥料溶出率	肥料供給量	肥料利用率	
			全体	内セル施用	全体	肥料由来			施肥量	実供給量
	被覆肥料	速効性	(kg ha <sup>-1</sup> )		(kg ha <sup>-1</sup> )				(%)	(%)
S80	セル	植穴	160	60	151	137	81.3	149	85.7	92.1
S80	セル	条施	160	60	162	148	81.3	149	92.6	99.6
S80	セル	作条混層	160	60	163	149	81.3	149	92.9	100.0
硫安	-	全面全層	200	0	177	163	-	200	81.5	81.5
無窒素	-	-	0	0	14	-	-	-	-	-

S80は被覆燐硝安、セルはセル施肥を示す。肥料供給量は被覆肥料の溶出率を換算した実質の供給窒素量。肥料利用率の実供給量は被覆肥料の溶出率を換算した供給量に対する利用率。



第 17 図 JA-COAT の画面例



# 論文審査結果要旨

近年わが国で開発された樹脂系被覆肥料はその含有成分の溶出が主として地温に依存しており、作物の生育ステージに応じて必要量が供給できるので肥効調節型肥料と呼ばれる。したがって従来の速効性化学肥料に比べて、施肥効率が著しく高く環境負荷が軽減される。また全量基肥施用でも肥料焼けを起こさず追肥省略による労力が軽減されるので環境に優しい持続的生産手段として注目されている。しかしながら、その溶出機構については不明な点が多く溶出予測は経験則に基づくものであった。

本研究では被覆肥料の溶出を正確に推定する手法を確立するためにその溶出機構を詳細に検討すると共に、溶出機構に基づく溶出測定モデルの確立、溶出推定に基づく野菜の施肥法の検討を行った。

被覆肥料の溶出機構については溶出に影響する諸要因について検討し、土壌 pH や土壌型、通常の土壌水分、微生物活性は殆ど影響せず、温度のみに依存することを確認した。次に溶出と水蒸気圧の関係を検討し、被覆肥料の溶出制御の主体は水蒸気圧であり、溶出速度の温度依存性は水蒸気の熱力学的特性によることを初めて明らかにした。

溶出推定モデルについては、水蒸気の熱力学的特性を考慮し溶出速度の温度依存性を反応速度論的に解析した。その結果、1次反応速度式で表した石橋ら（1992）のモデルがリニア型被覆肥料の温度特性に良く一致し、その溶出率を解析するのに有効であることを明らかにすると共に、この方法はシグモイド型被覆肥料の溶出タイプの適合性が悪く、パラメータと溶出機構の関係が明確でないので溶出誘導期間の変動を考慮した溶出推定モデル式を確立した。また、土壌劣化や気象変動に伴う極限的土壌条件である高濃度溶液中と超低水分土壌での溶出推定モデルも確立した。

溶出推定モデルに基づく溶出予測値の適合性を水田圃場、畑圃場に埋設した各種被覆肥料の溶出試験、露地畑に埋設した被覆肥料の溶出に対するマルチや植被の影響試験などから検討しその妥当性を明らかにした。さらにこのモデルを用いて施設栽培トマトやメロンの全量基肥施肥法や露地キャベツに対するセル育苗時全量施肥法や局所施肥法を提案し、その圃場栽培試験によって有効性を実証した。さらにこの溶出モデルの普及を図るために、パソコン上で起動する被覆肥料の溶出を推定するソフト「JA-COAT」を開発した。

本研究は環境負荷軽減が期待される肥効調節型被覆肥料の溶出機構の解明、それに基づく溶出推定モデルの開発と実証、普及のための溶出シミュレーションソフトの開発など持続的農業生産方式を実現するための精密農業に大きく貢献するものであり、審査員一同、博士（農学）の学位を授与するに値するものと判断した。